

УДК 621.313.17

ЗАВИСИМОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ РЕАЛЬНОГО УГЛА НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЯ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

Наний В.В., к.т.н, доц., доцент кафедры «Электрические машины» НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина,
v.naniy@mail.ru, 098-82-46-559.

Дунев А.А., асс. кафедры «Электрические машины» НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина, lex_from_khar@mail.ru, 097-63-99-690.

DEPENDENCE OF THE ROTATION TORQUE FROM THE REAL LOAD ANGLE OF MOTOR WITH A ROLLING ROTOR

Naniy V.V., cand.of engin. scien., ass. Professor, ass. Professor of Department of electric machines of the NTU «KPI», Kharkov, Ukraine
v.naniy@mail.ru, 098-82-46-559.

Dunev A.A., ass. of the cathedra “Electric machine” of the NTU «KPI», Kharkov, Ukraine,
lex_from_khar@mail.ru, 097-63-99-690.

Рассмотрена зависимость вращающего момента двигателя с катящимся ротором (ДКР) от угла нагрузки, варианты увеличения выходного момента двигателя за счет увеличения коэффициента трения качения, установлено влияние состояния поверхностей обкатывания на угол нагрузки машины.

The dependence of the torque from the actual load angle of the motor with a rolling rotor (MRR) in this article is considered. Discusses options for increasing the output torque by increasing the coefficient of rolling friction and the impact surface conditions on the machine load angle is notes.

Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, неравномерный воздушный зазор, реальный и идеализированный угол нагрузки, вращающий момент двигателя, шероховатость поверхности.

Keywords: motor with a rolling rotor, uneven air gap, the real and idealized load angle, rotation torque, surface roughness

Введение. Двигатели с катящимся ротором (ДКР), который рассматривается в данной работе – это машины синхронно-реактивного типа (СРД) с ферромагнитным ротором без обмотки. Роль вращающейся части в ДКР выполняет полый цилиндр, который, эксцентрично обкатываясь по

внутренней или внешней поверхности статора, специфично передает вращение на вал, совершая редукцию скорости и момента, [1].

Такой параметр СРД, как угол нагрузки, свойственен и ДКР, а так же характеризует его способность к преодолению нагрузки определенной величины. Чем больше этот угол, тем больше вращающий момент машины. Было показано, что реальный угол нагрузки, как и во всех синхронных двигателях, отличается от максимально возможного (90°). И главной причиной этого для ДКР является расходящийся воздушный зазор [2].

Определив величину реального угла нагрузки в машине и результирующую силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП), мы можем определить значения вращающего момента двигателя.

Основная часть. В работе рассмотрен 8-пазовый ДКР, со следующими показателями: внутренний диаметр статора – $D_{с.внутр.}=170$ мм; наружный диаметр ротора – $D_{г.нар.}=169,3$ мм; разность диаметров ротора и статора – $\Delta D = 0,7$ мм. Площадь зубца 8-пазовой экспериментальной модели машины составляет 1500 мм^2 (рис.1).

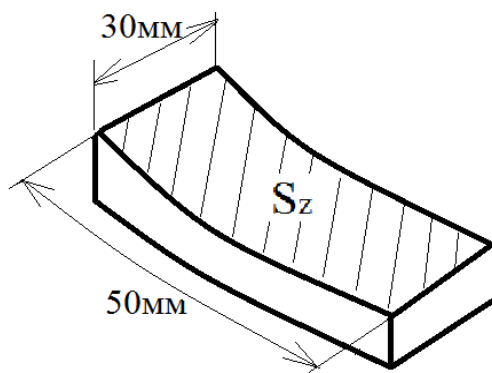


Рисунок 1 – Зубец 8-пазового ДКР

Рассмотрим варианты работы машины при 15° , 30° , 45° , 60° , 75° и 90° градусах угла нагрузки.

Вращающий момент в общем случае имеет вид:

$$M = Q_{рез} \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin \theta,$$

где M – расчетный момент ДКР при заданной силе ОМП и угле нагрузки;

D_r – диаметр ротора ДКР;

θ – реальный угол нагрузки двигателя.

При первом варианте с идеализированным углом нагрузки 15° [2], что соответствует $10,7^\circ$ реальных, сила одностороннего магнитного притяжения для него будет равняться $Q_{рез.15^\circ \text{ ид.}} = 5708$ (Н).

Момент в таком случае для угла нагрузки $10,7^\circ$ будет следующий:

$$M_{15^\circ \text{ ид.}} = Q_{рез} \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin \theta = 5708 \cdot \frac{169,3 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \sin(10,7^\circ) = 89,7 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Во втором варианте (30° идеализированный угол нагрузки, 19° – реальный), сила одностороннего магнитного притяжения – $Q_{рез.30^\circ \text{ ид.}} = 5500$ Н.

Момент для данного угла нагрузки будет:

$$M_{30^\circ \text{ ид.}} = Q_{рез} \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin \theta = 151,52 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

При идеализированном угле нагрузки в 45° (реальный угол нагрузки – 28°) сила ОМП равняется $Q_{рез.45^\circ \text{ ид.}} = 5466$ Н.

Результирующий момент для нее:

$$M_{45^\circ \text{ ид.}} = Q_{рез} \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin \theta = 217 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Результирующая сила ОМП для идеализированного угла нагрузки – 60° (реальны $40,5^\circ$) равна $Q_{рез.60^\circ \text{ ид.}} = 4980$ Н.

Полученный момент для данного угла нагрузки $M_{60^\circ \text{ ид.}} = 272 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$.

Сила ОМП для идеализированного угла нагрузки – 75° (45°) $Q_{рез.75^\circ \text{ ид.}} = 4560$ (Н). Момент для текущего реального угла нагрузки $M_{75^\circ \text{ ид.}} = 273 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$.

Если позволит коэффициент трения качения ротора по статору и сила ОМП для данного идеализированного угла нагрузки 90° , равная $Q_{рез.90^\circ \text{ ид.}} =$

3800 (Н), то момент для полученного реального угла нагрузки $\theta=59^\circ$ будет – $M_{90^\circ \text{ ид.}} = 275 (H \cdot м)$. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

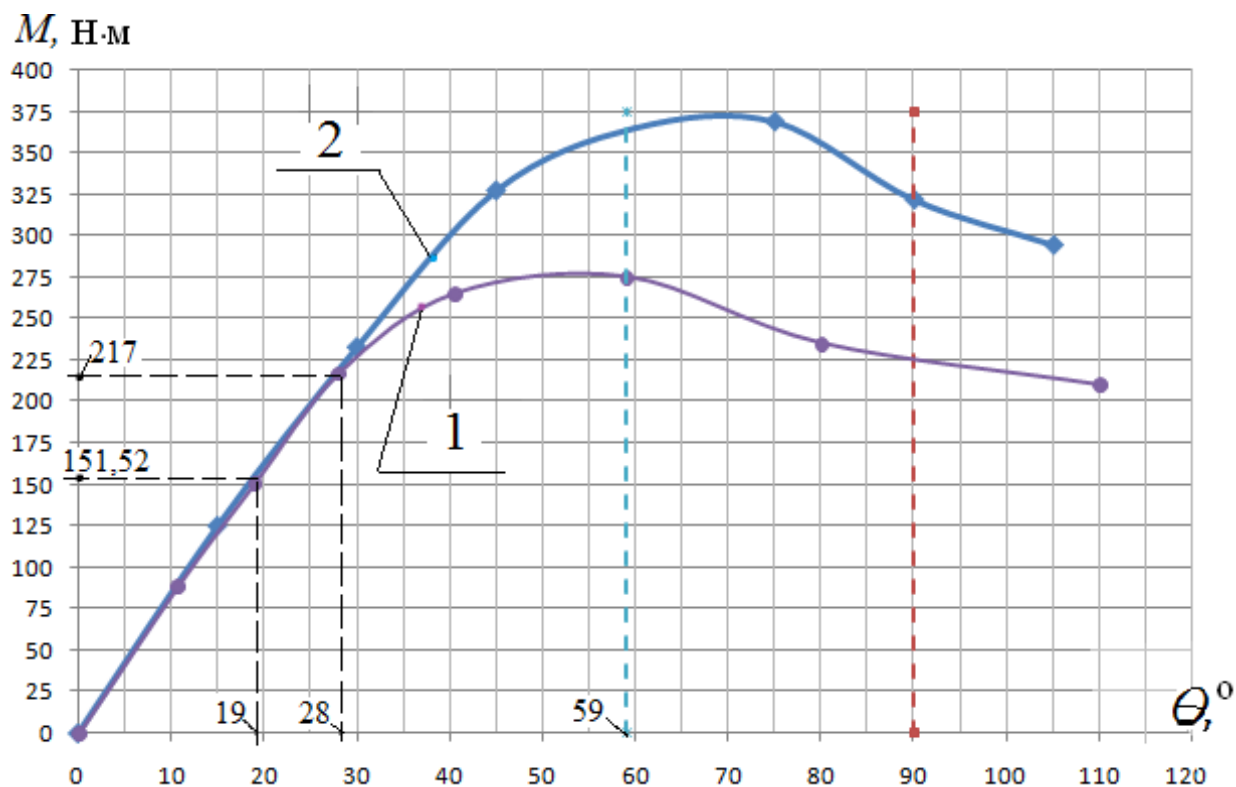


Рис. 2 – Графики зависимости момента ДКР от угла нагрузки:

1 – зависимость $M_{\text{реал}}(\theta_{\text{реал.}})$, 2 – зависимость $M_{\text{ид.}}(\theta_{\text{ид.}})$.

Как видно из графика, максимальный реальный момент в идеальном случае (качение без проскальзывания) вплоть до 90° идеализированных градусов, будет иметь значение 275 Нм.

«Срыв» ротора происходит при угле нагрузки в 90° идеализированных градусов, т.е. 59° реальных. Т.е угол между точкой контакта и реальным направлением действия силы ОМП – 59° при физическом смещении поля относительно неподвижного ротора на два дискретных шага переключения катушек (в момент короткого замыкания), [2].

Как видно из приведенных данных, расчетная величина момента равна 151,52 Нм и совпадает с реально полученным экспериментальными данными для 8-пазового ДКР, табл. 1. Поэтому можно утверждать, что ро-

тор (точка его контакта) отстает от силы ОМП на угол 19° реальных (при коротком замыкании и работе на упор), а далее происходит «срыв» ротора и его проскальзывание по внутренней поверхности статора, при данном коэффициенте трения качения и заданной нагрузке на валу машины.

Таблица 1 – Зависимость момента от угла нагрузки ДКР

Реал. момент, Нм	0	89,7	151,5	217	272	273	275	235	210
Реал. угол нагр. ($\theta_{\text{реал.}}$), $^\circ$	0	10,7	19	28	40,5	45	59	80	110
Ид. момент, Нм	0	125	232	327	365	368	321	285	275
Ид. угол нагр. ($\theta_{\text{ид.}}$), $^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	115	135

Так же следует отметить, что величина момента 275 Нм –максимально возможная величина, которую 8-пазовый двигатель с разностью диаметров 0,7 мм, способен развить. Возможность ДКР развивать максимальный момент может быть достигнута при условии наличия достаточного коэффициента трения поверхностей статора и ротора, для обеспечения их надежного сцепления без какого-либо проскальзывания, вплоть до максимально возможного реального угла нагрузки 59° .

Таким образом, можно утверждать, что 8-пазовый образец ДКР недоиспользован. И существует возможность увеличения его выходного момента в 1,8 раза, со 150 Нм до 275 Нм, за счет увеличения только лишь коэффициента трения качения.

Другими словами, есть необходимость увеличения шероховатости трущихся поверхностей статора и ротора путем нанесения слоя специального напыления, которое увеличит твердость и шероховатость поверхности, или, как крайний случай, применение зубчатого зацепления между ротором и статором.

Если рассмотреть экспериментально полученный момент в ДКР величиной 150 Нм, при угле нагрузки 19° реальных, то можно отметить, что данное значение было достигнуто при наличии коэффициента трения качения «сталь по стали» $k=0,03$.

Исходя из теории физики твердого тела и расчетных математических формул, описывающих цилиндр, лежащий на ровной наклонной поверхности, можно сказать, что угол наклона поверхности, вместе с углом нагрузки ДКР, в рассматриваемой задаче – это одни и те же величины. Поэтому для определения коэффициента трения ротора по статору, воспользуемся теорией классической физики, рис. 3.

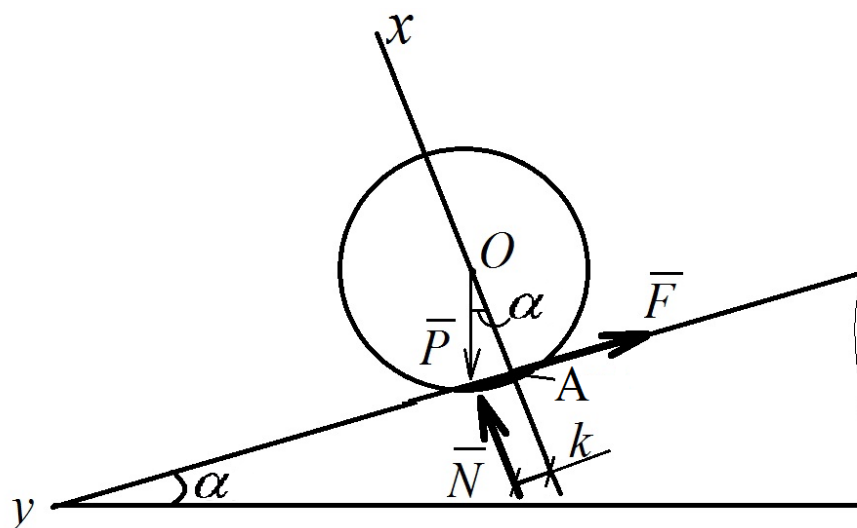


Рис. 3 – Модель для определения коэффициента трения.

На рис. 3 приняты обозначения:

P – сила тяжести, F – сила трения, N – нормальная реакция опоры,

α – угол наклона плоскости к горизонту,

k – коэффициент трения качения, т.е. смещения нормальной реакции опоры от нормали Ax .

Применительно к нашему случаю, роль силы тяжести в системе выполняет сила ОМП. Сила одностороннего магнитного притяжения ротора к статору, для реального угла нагрузки 19° , составляет 5500 (Н).

Сила тяжести ротора в нашем случае будет равна $P = mg = 2 \cdot 9,8 = 19,6$ (Н).

Это 0,35 % от полезной силы ОМП, поэтому можно сделать вывод, что сила тяжести ротора, относительно Земли, настолько мала, что в системе ДКР ею можно пренебречь.

Угол α в рассматриваемой задаче является углом наклона поверхности, на которой размещен цилиндр радиусом r . И, применительно к нашей задаче для определения коэффициента трения, его можно рассматривать, как реальный угол нагрузки. Угол α можно определить по следующей формуле:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{k}{r} \right),$$

где r – радиус рассматриваемого цилиндра, или ротора, $r = 84,65$ мм, k – коэффициент трения качения.

Отсюда можно выразить необходимый коэффициент трения качения, подставив в формулу имеющийся реальный угол нагрузки α :

$$k = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot r = \operatorname{tg}(19^\circ) \cdot 84,65 \cdot 10^{-3} = 0,02914 \approx 0,03.$$

Т.е. если создать условия, при которых ротор будет обкатываться по расточке статора без проскальзывания, и иметь реальный угол нагрузки больше текущего 19° , то, как показывает расчет, при увеличении коэффициента трения качения и, соответственно, угла нагрузки, момент, в тех же габаритах машины, можно существенно увеличить. Сила тока в катушках и сила одностороннего магнитного притяжения остаются неизменными.

Например, при увеличении коэффициента трения качения в 8-пазовом ДКР, и достижении точкой контакта реального угла нагрузки 28° , можно говорить об увеличении момента от 151 Нм до 217 Нм.

Коэффициент трения качения при этом должен иметь значение $k=0,045$. Т.е. $k = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot r = \operatorname{tg}(28^\circ) \cdot 84,65 \cdot 10^{-3} = 0,045$.

Выводы. Опираясь на полученные результаты, можно отметить, что увеличение коэффициента трения качения в 1,5 раза, может дать увеличение выходного момента на 44 %.

Если рассмотреть вопрос нанесения специального порошкового материала на поверхности обкатывания, то можно отметить, что увеличение шероховатости путем микронапыления, может привести к появлению заметных неровностей на рабочих поверхностях магнитопровода, участвующих в замыкания силовых линий магнитной индукции по цепи «статор - ротор». В свою очередь, эти неровности, могут привести к появлению областей с микровоздушными зазорами, которые могут препятствовать полноценному замыканию силовых линий индукции по магнитопроводу и, как следствие, уменьшать результирующей силы ОМП. Но, так как дополнительная шероховатость будет иметь величину на уровне микрометров, и привнесет в магнитную систему незначительные возмущения, то это уменьшение силы ОМП будет несущественным по сравнению с тем, что может внести в выходной момент увеличение коэффициента трения.

Так же необходимо отметить, что увеличения реального угла нагрузки, при котором работает машина в режиме короткого замыкания, до величины реальных $40,5^\circ$ позволит максимально использовать возможности создания момента в рассматриваемом образце ДКР. Так как характеристика выходного момента от реального угла нагрузки в пределах от 40° до 59° достигает максимума, то и момент здесь достигает своего предельного значения. Поэтому при работе ДКР с реальным углом нагрузки от $40,5^\circ$ и выше, машина выходит на предельные значения в плане создания максимально возможного вращающего момента.

Поэтому можно сделать вывод, что увеличение коэффициента трения качения в ДКР является одним из основных параметров двигателя, обеспечивающим увеличение основного вращающего момента.

Список литературы:

1. Бертинов А.И., Варлей В.В. Электрические двигатели с катящимся ротором. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.: ил.

2. Наний В.В., Дунев А.А. Влияние неравномерности воздушного зазора ДКР на величину угла нагрузки. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». 2012. – № 28. – 167с. – с.65-69.

Сведения об авторах:

Наний Виталий Викторович, 61123, г. Харьков, пр. Тракторостроителей, 89, кв. 14, тел. 057-751-21-65, 098-824-65-59.

E-mail: v.naniy@mail.ru

Дунев Алексей Александрович, 61112, г. Харьков, пр. 50-летия ВЛКСМ, д. 80, кв. 49, тел. 097-639-96-90.

E-mail: lex_from_khar@mail.ru